



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

STAVBA 5TI OSÝCH FRÉZOVACÍCH STROJŮ

BUILDING OF 5-AXIS MILLING MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB ANDRÝSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing., Dipl.-Ing MICHAL HOLUB, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Andryšek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Stavba 5ti osých frézovacích strojů

v anglickém jazyce:

Building of 5-axis milling machines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pětiosé obráběcí centra patří mezi stroje, které mají vysoký potenciál nasazení v dalších deseti letech. Mezi jejich přednosti patří vysoká univerzálnost, preciznost, vysoký stupeň automatizace, které jsou uplatnitelné pro obrábění tvarově velmi náročných dílců. Cílem práce je popsat aktuální trendy v oblasti stavby a kontroly 5ti osých obráběcích frézovacích strojů.

Cíle bakalářské práce:

- podrobná rešerše stavu techniky u vybraných výrobců 5ti osých frézovacích strojů
- základní výpočty vybraných paramterů pro vybrané 5ti osé frézovací centra

Seznam odborné literatury:

- www.infozdroje.cz
- Marek J, Novotný L, Smolík J, Blecha P, Březina T, Sulitka M, et al. (2010). Konstrukce CNC obráběcích strojů (MM Speciál., p. 420). Praha: MM publishing, s.r.o.
- Berník P, Pič J., Obráběcí stroje - konstrukce a výpočty. 2. vyd. Praha: SNTL, 1986. 573 s. ISBN 04-235-86
- Janíček P, Ondráček E, Vrbka J.: pružnost a pevnost I
- Hoschl C.: Pružnost a pevnost ve strojnictví
- Weck M, Brecher Ch, Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. uberarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

Vedoucí bakalářské práce: Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato práce je zaměřená na pětiosá frézovací centra. V první části je krátce popsána historie vývoje, dále základní kinematické rozdělení a přehled základních částí těchto strojů. Dále jsou popsány metody zjišťování tuhosti stroje a výpočet rozběhu vřetene. Práce se také krátce zabývá snižováním energetické náročnosti obráběcích strojů a inteligentními systémy, bez kterých se dnešní stroje již neobejdou. V druhé části práce jsou zvoleny tři stroje od různých výrobců a porovnány jejich nabízené komponenty a celkové vlastnosti. V poslední části práce je výpočet pro návrh pohonu vřetene, pro zvolený materiál a nástroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pětiosé frézování, inteligentní technologie, porovnání strojů, MCU 700VT 5X, VARIAXIS i800, DMU 85 FD Mono Block.

ABSTRACT

This work is focused on the five-axis milling machines. The first section shortly describes the history of development, basic kinematic distributions and overview of the basic components of these machines. There are also described methods of detecting machine stiffness and calculation of the acceleration of the spindle. Work is also briefly engaged in reducing the energy demand of machine tools and intelligent systems, without which today's machines can not work already. In the second part are selected three machines from different manufacturers and compares their offered components and overall performances. The last part describes the calculation for the design of the drive spindle for the selected material and tools.

KEYWORDS

Five-axis milling, smart technology, compered machines MCU 700VT 5X, VARIAXIS i800, DMU 85 FD Mono Block.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ANDRÝSEK, J. *Stavba pětiosých frézovacích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 42 s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-ing Michal Holub, Ph.D..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing., Dipl.-ing Michal Holub, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....

Jakub Andrášek



PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce Ing., Dipl.-ing Michalu Holubovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu.



OBSAH

Úvod	10
1 Základní pojmy	11
1.1 Historie obráběcích strojů	11
1.2 Historie vývoje pětiosých obráběcích center	11
1.3 Základní rozdělení pětiosých obráběcích center	11
1.3.1 Hlava hlava	11
1.3.2 Hlava stůl	12
1.3.3 Stůl stůl	12
1.3.4 Stůl stůl kolíbka	12
1.4 Komponenty pětiosých frézovacích center	13
1.4.1 Otočné naklápěcí stoly	14
1.4.2 Vřetena	16
1.4.3 Posuvové soustavy	17
1.4.4 Nosná soustava	18
2 Tuhost obráběcího stroje	19
3 Výpočet rozběhu vřetene na jmenovité otáčky	20
4 Energetická náročnost	21
5 Inteligentní technologie	22
5.1 Aktivní kontrola vibrací	22
5.2 Inteligentní teplotní štít	22
5.3 Inteligentní bezpečnostní štít	23
5.4 Verbální poradce	23
5.5 Inteligentní výkon vřetena	23
5.6 Inteligentní podpora údržby	24
5.7 Inteligentní vyvažovací analyzátor	24
5.8 Inteligentní systém podavače materiálu	24
5.9 Anti kolizní systém	25
6 Porovnání vybraných strojů	26
6.1 MCU 700VT-5X	26
6.2 VARIAXIS i800	27
6.3 DMU 85 FD Mono Block	28
6.4 Základní parametry	28
6.5 Nabízená vřetena	29
6.5.1 Vřetena pro MCU 700VT 5X	29
6.5.2 Vřetena VARIAXIS i-800	30



6.5.3	Vřetena DMU 85 FDMono Block	31
6.6	Zásobníky nástrojů	32
6.7	Řídicí systémy	33
7	výpočet krouticího momentu vřetene	34
	Závěr	36
	Seznam použitých zkratk a symbolů	39
	Seznam obrázků	41
	Seznam tabulek	42



ÚVOD

V dnešní době jsou kladeny stále větší požadavky na přesnost, automatizaci, pracovní efektivitu a hospodárnost obráběcích strojů, tyto požadavky vedou k vývoji nových technologií, které zlepšují vlastnosti těchto strojů. Pětiosé frézovací stroje jsou nenahraditelnou součástí při obrábění rozměrově komplikovaných obrobků. Je patrné, že se zvyšuje podíl univerzálních pětiosých frézovacích strojů, které dokáží obrobit i rotační součásti na jedno upnutí, což výrazně zkracuje výrobní časy.

Frézovací stroje se vyrábí s velkou variabilitou komponent, každý výrobce nabízí ke svému stroji několik typů vřeten, stolů, zásobníků nástrojů či ovládacích systémů, které si zákazník navolí dle požadavků aplikace, pro kterou je stroj určen. Díky tomuto systému je možné i s relativně malým počtem vyráběných strojů dosáhnout uplatnění v široké škále aplikací.

Cílem této práce je zhodnotit stav techniky pětiosých frézovacích strojů, Stroje byly vybírány k referenčnímu stroji MCU 700VT 5X od firmy Kovosvit MAS, parametry pro výběr byly průměr stolu okolo 800 mm, výroba v odlišných zemích a kolébkový pracovní stůl, tudíž 3+2 frézování. Zvolené stroje jsou stroje multifunkční, což znamená, že jsou uzpůsobeny jak k frézování, tak k soustružení.



1 ZÁKLADNÍ POJMY

1.1 HISTORIE OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

První NC řízené stroje byly vyvinuty v 50. letech. Tyto stroje byly řízeny pomocí děrných štítků, děrných pásek nebo magnetických pásek. Každý stroj měl vlastní čtečku, která signál převáděla na elektrické impulzy, pomocí kterých se stroj řídil. V 70. letech byly vyvinuty CNC obráběcí stroje, což byly první stroje, které používaly k řízení vlastní počítač. Tyto stroje měly již řídicí panel s obrazovkou, na které se zobrazoval CNC kód, který se dal do stroje zadávat přímo pomocí klávesnice. Kód mohl být také nahrán pomocí počítačové sítě nebo disket a následně na řídicím panelu upravován. Výhodou CNC strojů bylo také to, že si dokázali pamatovat několik výrobních programů, měly grafické rozhraní, které umožňovalo kontrolu před samotným obráběním[5].

1.2 HISTORIE VÝVOJE PĚTIOSÝCH OBRÁBĚCÍCH CENTER

V roce 1972 byla uvolněna jedna miliarda korun z českého státního rozpočtu, na vývoj strojů třetí vývojové generace. V TOS Trenčín se sešlo 8 konstruktérů z různých českých strojírenských podniků, byl před ně položen komplikovaný úkol, návrh strojů k opracování přírubových, tyčových a trubkových dílů. Konstruktéři navrhli několik strojů, které následně šly do výroby. Poté ale zjistili, že koncept strojů na obrábění tyčí je příliš složitý. Jednalo se o tři stroje, dva stroje obráběcí, manipulátor mezi nimi přesouval obrobek a obráběl tak tyč z obou stran. V roce 1977 poprvé Ladislav Borkovec načrtl univerzální obráběcí stroj, jednalo se o univerzální typ stroje, na kterém bylo možno jak soustružit tak frézovat. Nesetkal se však hned s pochopením technického okolí. Proto ve svém volném čase zhotovil dřevěný model (1:10) který následně představil a díky modelu, přesvědčil ostatní o vhodnosti jeho řešení. Tým konstruktérů vedený Borkovcem získal za stroj MCSY 50 několik ocenění. Po úspěšném odzkoušení stroje MCSY a problémech při oživování a zkouškách strojů třetí generace byl v roce 1987 ukončen jejich vývoj. MCSY byl předchůdce multifunkčních obráběcích center vyvinutých z center soustružnických a nahradil stroje třetí vývojové generace [6].

1.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PĚTIOSÝCH OBRÁBĚCÍCH CENTER

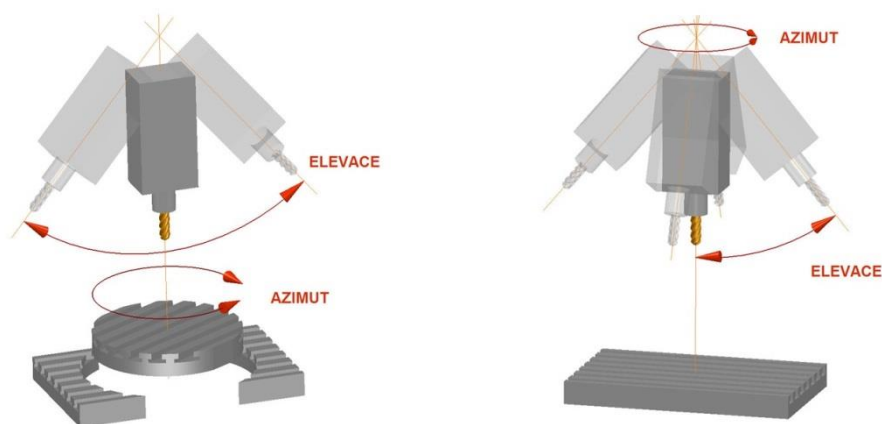
Pětiosá frézovací centra mají pět pohybových os, tři translační, x, y, z a rotační, a, b, c, jsou to vždy pouze dvě ze tří rotačních. Přičemž rotační osa a rotuje okolo translační osy x, osa b okolo y a osa z okolo c. Tato centra můžeme dělit podle několika kritérií, například podle toho, jestli rotační pohyby vykonává stůl nebo hlava s nástrojem [1].

1.3.1 HLAVA HLAVA

Tento typ stroje má pohyblivou obráběcí hlavu v úhlu azimutu i v elevaci a rotační osu okolo nástroje. Schéma je na obr. 1. Toto uspořádání je vhodné především pro portálové stroje, pro obrábění rozměrově velkých dílů. Nevýhodou tohoto typu stroje je nižší tuhost vřetene [1].

1.3.2 HLAVA STŮL

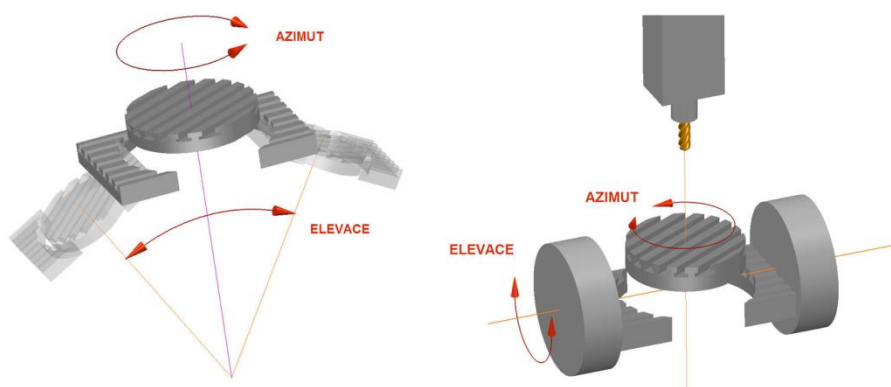
Tento typ stroje má rotaci rozdělenou mezi hlavou s nástrojem a stolem. Schéma je znázorněno na obr. 1. Hlava zajišťuje elevaci s neomezeným úhlem. Rotaci v azimutu vykonává stůl. Stůl také vykonává elevaci. Tento systém je tužší než systém hlava hlava[1].



Obr. 1 Vlevo hlava stůl, vpravo hlava hlava[1]

1.3.3 STŮL STŮL

U tohoto typu stroje zajišťuje jak rotaci v azimutu, tak elevaci náklonný stůl. Schéma na obrázku obr. 2. Taková konfigurace stroje má výhodu především v tuhosti a snadném odjetí od obrobku při frézování. Vřeteno je u tohoto kinematického typu vertikální v ose z [1].



Obr. 2 Vlevo stůl stůl, vpravo stůl stůl kolíbka[1]

1.3.4 STŮL STŮL KOLÍBKA

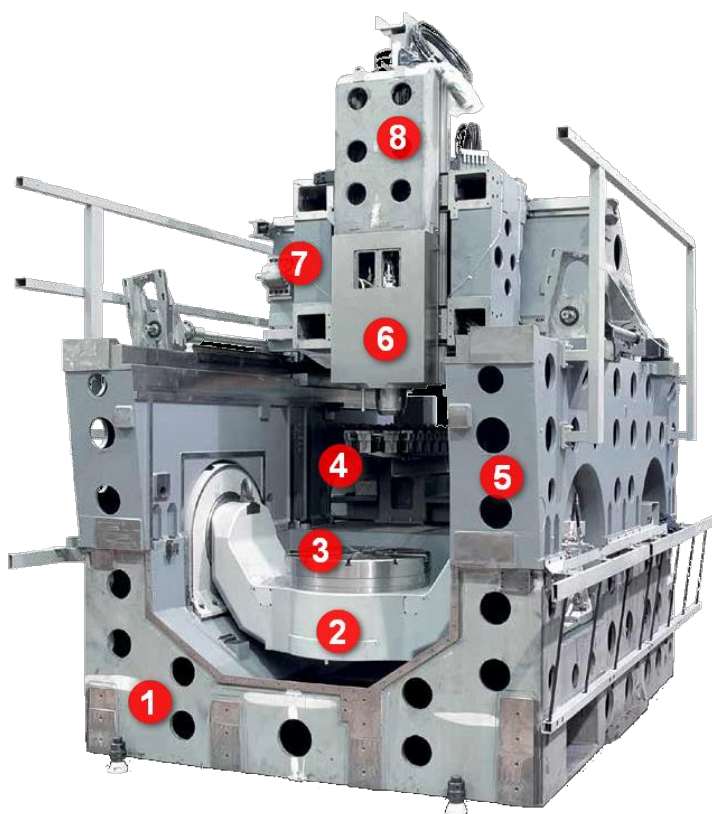
Tento typ strojů je podobný konfiguraci stůl stůl, využívá ale jiný druh uchycení stolu, kolíbkou, která je uchycena na obou koncích ve stroji. Pětiosé stroje s touto kinematikou se označují jako 3+2 frézovací stroje [1].

1.4 KOMPONENTY PĚTIOSÝCH FRÉZOVAČÍCH CENTER

Dnes se vyrábí stroje s velkou variabilitou komponent, u každého stroje je na výběr různý typ vřeten, stolů, zásobníků nástrojů či chlazení. Pětiosé frézovací stroje mají několik nejdůležitějších základních komponent, které jsou znázorněny na obr. 3. Zákazník si také může navolit vlastní parametry obráběcího stroje a firma zabývající se výrobou mu takový stroj vyrobí, ovšem také za individuální cenu.

Na obrázku č. 5 je odkrytovaný stroj MCU 700VY-5X firmy Kovosvit MAS. Základní části tohoto stroje jsou [4]:

1. Lože
2. Otočný naklápěcí stůl
3. Pracovní stůl
4. Zásobník nástrojů
5. Stojany
6. Vřeteno
7. Saně
8. Smykadlo



Obr. 3 MCU 700VT-5X [4]

1.4.1 OTOČNÉ NAKLÁPĚCÍ STOLY

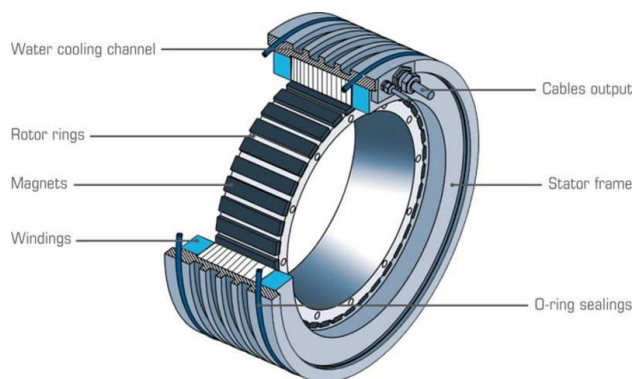
Za pomoci naklápěcích stolů se dají tříosé frézky upravit na stroje čtyřosé, případně přidáním další rotační osy na stroje pětiosé. Naklápěcí stoly výrazně zvyšují efektivitu výroby a taktéž umožňují výrobu výrazně komplikovanějších výrobků, což je zapříčiněno také tím, že je možné obrábět součást na jedno upnutí. Univerzální stroje s otočnými naklápěcími stoly mohou jak frézovat tak soustružit[3].



Obr. 4 Otočný naklápěcí stůl Ultrasonic 65 mono BLOCK [7]

Stoly je možné pohánět dvěma způsoby a to přímo, pomocí torzních prstencových motorů, nebo nepřímo, pomocí servopohonů přes vložené převodovky či řemenové převody.

V dnešní době se pro pohony stolů používají především motory přímé, torzní, prstencové. Tyto motory se skládají ze statoru, na kterém je statorové vinutí, a rotoru, na kterém jsou z vnější strany permanentní magnety. Motory jsou nejčastěji zapojeny do hvězdy a napájeny třífázovým proudem. Tyto motory jsou bezkartáčové a jsou řízené elektronicky. Torzní motory při vyšším zatížení generují velké množství tepla, které je nutno odvádět ze stroje, z tohoto důvodu se využívá chlazení vzduchové nebo účinnější vysokotlaké vodní. Tyto motory nacházejí uplatnění především u aplikací, kde je důležité dosáhnout vysokých otáček stolu [6][8].



Obr. 5 Torzní motor [8].

Nepřímé pohony bývají realizovány například pomocí servomotoru a šnekového soukolí, nebo pomocí kuželové převodovky. Tyto konfigurace dosahují vyššího přenosu krouticího momentu a výkonu, oproti torzním motorům avšak dochází k vyššímu opotřebení součástí a je nutná častější údržba [6].

Pro uložení stolů se využívají kuželíková nebo válečková ložiska, které mohou obsahovat přímé odměřování polohy stolu. Stůl může být uložen na samostatných vhodně umístěných axiálních a radiálních ložiscích nebo na ložiscích hydrostatických [6].

Odměřování polohy stolů bývá většinou přímé, fotoelektrické a inkrementální. V dnešní době se začínají používat i magnetické snímače polohy, které dosahují přesnosti, až $1\text{ }\mu\text{m}$ tyto snímače využívají k vyhodnocování Hallových sond. Magnetické sondy jsou oproti optickým konstrukčně jednodušší, tím pádem i levnější [9].



Obr. 6 Magnetické odměřování kruhové a lineární [9]

Naklápěcí stoly bývají uloženy buď oboustranně, nebo pouze jednostranně a to v otočné naklápěcí ose a. Uložení stolu oboustranně má výhodu oproti jednostrannému uložení především v tuhosti uspořádání, oboustranné uložení dosahuje také vyšších přesností a dokáže přenášet větší momenty. Oboustranné uložení může být poháněno dvěma motory. Jednostranné uložení má výhodu v úspoře prostoru. Tato konfigurace díky svým nevýhodám není tak rozšířená [3].

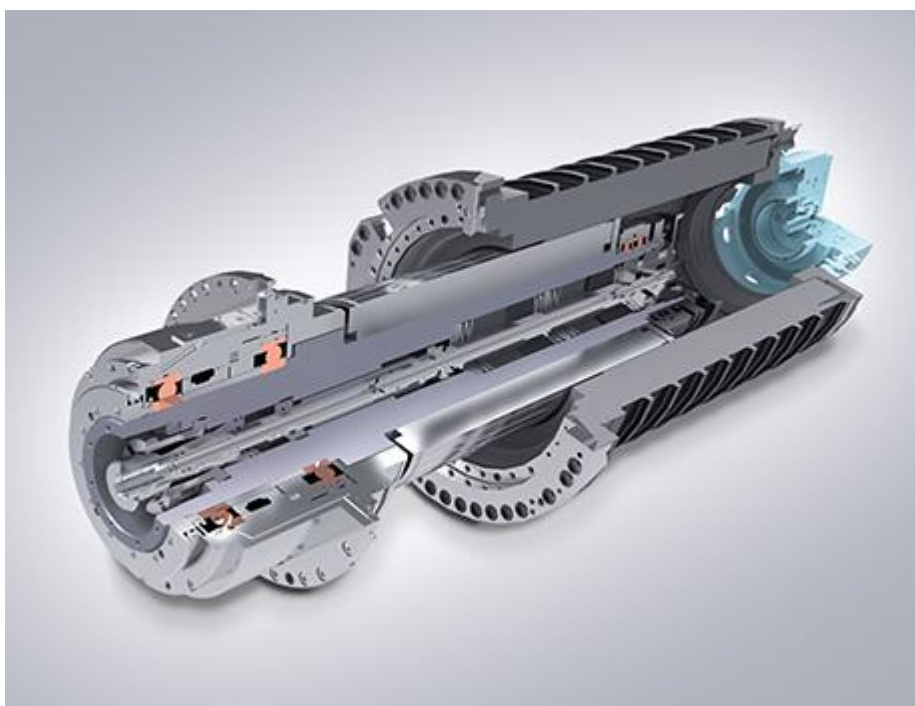
Důležitou součástí stolů jsou brzdy, které jsou nutné zejména pro přesné polohování stolu, protože pohony stolu nedokáží při obrábění udržet stůl v dané poloze bez kolísání. Jsou také důležité pro včasné zastavení obrobku. Brzdy se používají hydraulické, pneumatické a k fixování polohy také Hirthovo ozubení [11].



1.4.2 VŘETENA

Vřetena zajišťují přenos řezné síly z pohonu přes nástroj na obrobek, je tedy žádoucí aby dosahovala co nejvyšší tuhosti a přesnosti. Pohony vřeten můžeme dělit do několika základních skupin. Do první skupiny patří vřetena s přímým náhonem, tato vřetena jsou připojena k pohonu přímo, bez použití převodovky. Další skupina jsou vřetena s pohonem přes vloženou převodovku, tato vřetena mají velký výkon a k přenosu využívají převážně planetové převodovky, které mají malé rozměry a dokáží přenášet velké výkony. Další typ pohonu je pomocí řemenového převodu, tento typ vřeten využívá k pohonu řemenů, řemeny mají výborné tlumicí vlastnosti, avšak při rozjezdu se rozkmitávají, také musí být trvale předepnuty, což způsobuje prodlužování řemene.[6].

Vřetena s integrovaným pohonem mají elektromotor přímo ve vřetenu, kdy stator je pevně spojen s vnějším pláštěm vřetene a rotor je pevně spojen s vřetenovou hřídelí. Tato vřetena se používají pro vysokorychlostní obrábění. Oproti ostatním mají přednosti především v přesnosti, tuhosti, nízké a hladině vibrací což je zčásti způsobeno uložením. Elektrovřetena se vzduchovým uložením dosahují rychlosti až $200\,000\text{ min}^{-1}$. V elektrovřetenech se využívá především kuličkových keramických ložisek. Tato vřetena generují při velkém momentovém zatížení velké teploty, je tedy nutné vřetena chladit. Používá se vysokotlaké kapalinové chlazení, čímž je zamezeno tepelné dilataci vřetene, která má přímý vliv na přesnost obráběcího stroje[13][14].

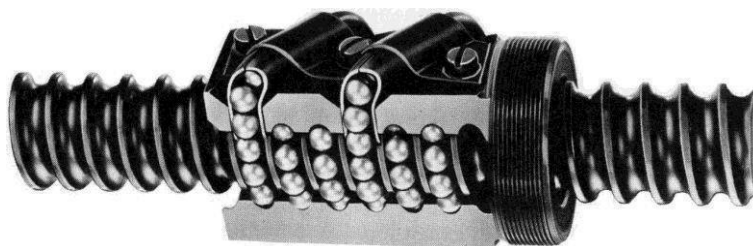


Obr. 7 Elektrovřeteno powerMASTER m1000 DMG MORI [15]

Vřetena bývají vybavena různými systémy pro upínání nástrojů, v Evropě nejčastěji kužely ISO 30, SIO 40 a vysokorychlostní stroje využívají kužel HSK. Vřetena bývají vybavena různými měřicími senzory, například senzory pro měření vibrací, teploty, otáček. Na základě změřených veličin dochází pomocí řídicího systému k regulaci veličin. Klasická vřetena s externím pohonem nedosahují takových přesností, rychlostí ani tuhosti, jakých dosahují vřetena s integrovaným motorem [13][14].

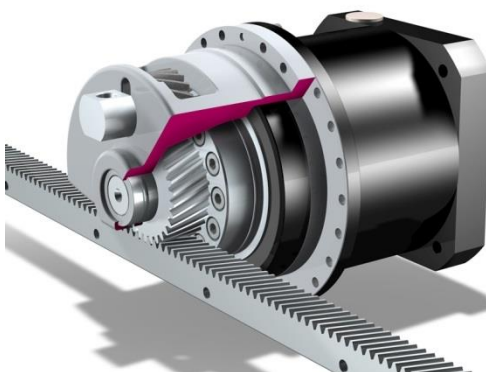
1.4.3 POSUVOVÉ SOUSTAVY

Náhon posuvových soustav se provádí pomocí tří základních principů. První je za pomoci kuličkového šroubu. Pohon pomocí kuličkového šroubu se dá realizovat dvěma způsoby. V prvním se šroub otáčí a matice se posouvá, ve druhém případě se matice otáčí a zároveň posouvá, zatímco šroub stojí. Pro náhon matice nebo šroubu se používají střídavé servopohony. V dnešní době se používají kuličkové šrouby s valivým třením, které mají menší opotřebení závitů matice a šroubu. Kuličky matice a šroubu bývají ocelové, kalené a broušené. Kuličkové šrouby mají výhody ve vysoké účinnosti, dosahují malých vůlí a nízkého opotřebení [6].



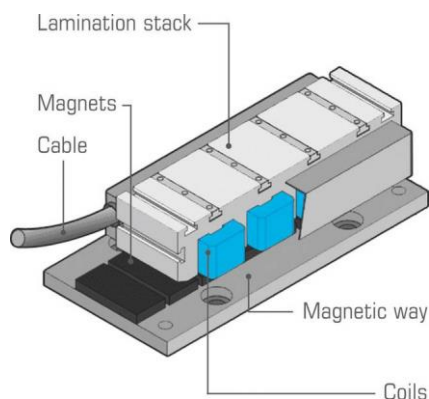
Obr. 8 Kuličkový šroub [16]

Druhá možnost náhonu posuvové soustavy je pomocí pastorku a hřebene. Toto uspořádání se používá ve strojích s velkými zdvihy, které již dvojice šroub matice z výrobních důvodů nedokáží obstarat. Při použití pastorku a hřebene je nutné vymezit vůli této dvojice, toho se docílí přidáním dalšího pastorku do soustavy, pomocí kterého dojde k vymezení vůle. Pastorky mají také opačně orientovaný sklon zubů [6].



Obr. 9 Pohon s hřebeny ZTRS-PH(A) se šikmým ozubením od STÖBER [17]

Třetí možností pohonu je pomocí lineárního motoru. Tyto motory nemají žádné vložené převody a síly působí přímo na support. Jeden díl motoru je připevněn ke stolu a druhý díl k loži. Tyto motory dosahují vysokých pojezdových rychlostí a zrychlení, avšak dokáží vyvinout pouze malou sílu. Pokud potřebujeme zvyšovat sílu, kterou motor působí na support, musíme přidat další motor. Tyto motory musí mít stejné napájení řízení i odměřování. Lineární motory generují velké množství nežádoucího tepla, které se musí odvádět chlazením. Do obvodu také vnáší nežádoucí magnetizmus, jenž se přes vedení šíří do stroje [6][8].



Obr. 10 Lineární motor [8]

1.4.4 NOSNÁ SOUSTAVA

Nosná soustava stroje se skládá z komponent, které se podílejí na přenosu obráběcích sil od nástroje k obrobku, jsou to jak pohyblivé tak nepohyblivé části. Nosná soustava má přímý vliv na přesnost obráběcího stroje, přenáší totiž síly z obrábění, dynamické síly z pohybu stroje a statické síly. Do nosné soustavy patří například rám stroje, vřeteno, atd. Požadované vlastnosti nosných soustav jsou dobrá tepelná stabilita, vysoká statická tuhost a dynamická stabilita [4].

2 TUHOST OBRÁBĚCÍHO STROJE

Tuhost stroje má zásadní vliv na jeho přesnost. Statická tuhost stroje se může určovat buďto pro jednotlivé komponenty stroje, pro soustavy součástí, (například tuhost vřetene), nebo jako celková statická tuhost stroje, která je složena z dílčích tuhostí [6][14].

Pokud uvažujeme, že je statická tuhost v posunutí, ohybu a krutu v sestavě konstantní, můžeme ji vypočítat dle vztahů uvedených níže [14][6].

Tuhost v posunutí:

$$k = \frac{F}{\delta} [N\mu m^{-1}] \quad (2.1)$$

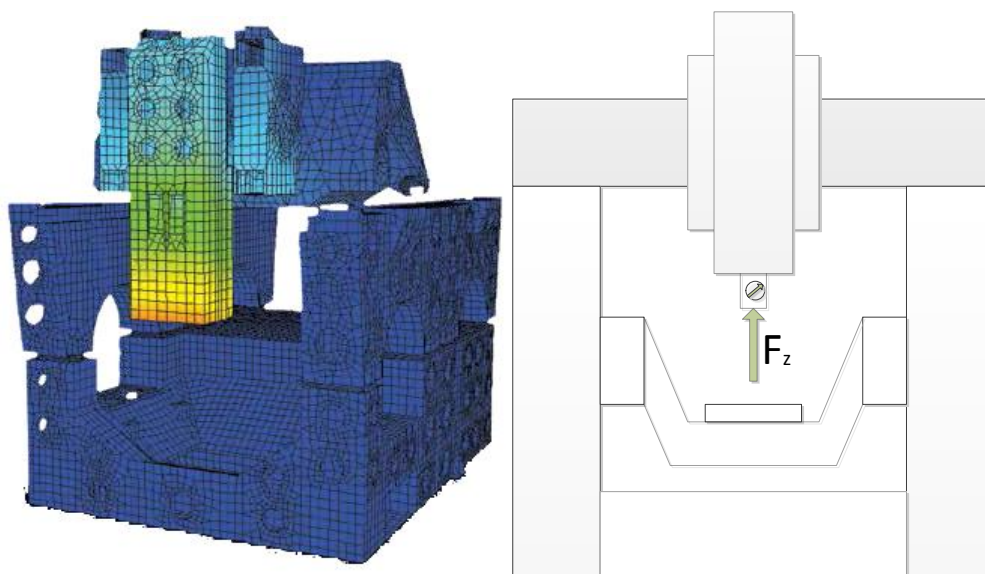
Tuhost v ohybu:

$$k_o = \frac{F}{\delta} [N\mu m^{-1}] \quad (2.2)$$

Tuhost v krutu:

$$k_k = \frac{M_k}{\varphi} [Nm \text{ rad}^{-1}] \quad (2.3)$$

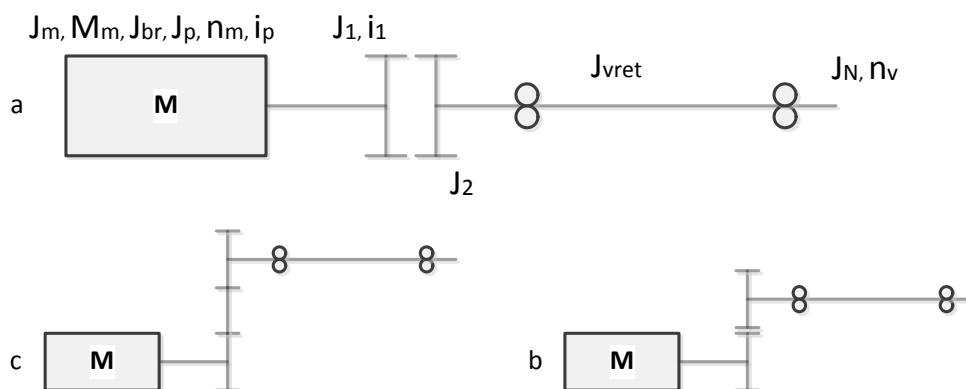
Tuhost obráběcího stroje se zjišťuje numericky, pomocí metody konečných prvků, nebo experimentálně. V případě experimentálního výpočtu se nejprve zvolí forma a velikost zatížení a následně se na analogovém či digitálním úchylkoměru měří deformace stroje. Příklad zjišťování tuhosti v ose Z, je schematicky znázorněn na obr. 13. Zatížení působí v ose Z, v sérii je zapojen tenzometr pro měření zatěžující síly, následně je měřena deformace v ose z. Experimentální metoda je zpravidla přesnější než numerická. Numerická metoda se využívá především při navrhování nových strojů [14][6].



Obr. 11 Vlevo výpočtový model pomocí MKP, vpravo schéma měření deformace v ose z [4]

3 VÝPOČET ROZBĚHU VŘETENE NA JMENOVITÉ OTÁČKY

Přenos krouticího momentu se realizuje několika způsoby, hlavní z nich jsou pomocí řemene, znázorněno na obr. 14c, pomocí ozubených kol, znázorněno na obr. 14b a pomocí vloženého převodu či elektrovřetene, obr. 14a. Při použití elektrovřetene se za hodnoty převodových poměrů dosazuje $i_p, i_1 = 1$. Moment setrvačnosti reprezentuje rozložení hmoty v prostoru, kterou je nutné urychlit. Čas rozběhu vřetene na jmenovité otáčky a následně na maximální otáčky je velmi důležitý parametr z hlediska vedlejších časů[6].



Obr. 12 Schéma přenosu krouticího momentu

Výpočet času rozběhu vřetene.

Moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$J_{red} = J_m + J_{br} + J_p + J_1 + \frac{J_v + J_N + J_2}{i_p^2 \cdot i_1^2} [kgm^2] \quad (3.1)$$

Úhlové zrychlení motoru:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_v \cdot i_p \cdot i_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_v}{t_r} \cdot i_p \cdot i_1 [rad \cdot s^{-2}] \quad (3.2)$$

Doba rozběhu motoru:

$$t_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_v \cdot i_p \cdot i_1}{\varepsilon_m \cdot \eta_c} [s] \quad (3.3)$$

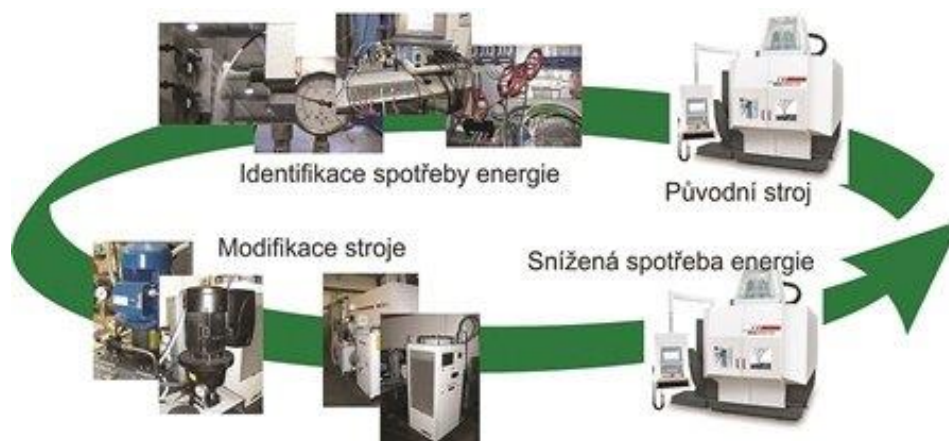
$$t_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_v \cdot i_p \cdot i_1 \cdot J_{red}}{M_m \cdot \eta_c} [s] \quad (3.4)$$

Dosazení známých veličin pro vřeteno POWER nabízené ke stroji MCU 700 VT 5X:

$$t_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot 13,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot J_{red}}{340 \cdot 0,96} = 0,26 \cdot J_{red} [s] \quad (3.5)$$

4 ENERGETICKÁ NÁROČNOST

U výrobců obráběcích strojů je čím dál více patrný trend snižování spotřeby energie. Většina velkých výrobců zařadila do prodeje několik strojů s nižší energetickou spotřebou. Úspory energie se dosahuje především snížením spotřeby energie pomocných agregátů či jejich nastavením na optimální hodnoty, například vypínáním čerpadla chladicí kapaliny či emulze, regulací ventilátorů a osvětlení. Nižší energetické náročnosti se dosahuje také redukcí setrvačných hmot, které je nutné rozpohybovat a rekuperací energie pomocí měničů při brždění. Energie se také šetří uvedením stroje v době nečinnosti do spánku, čímž se výrazně sníží hluchnost a spotřeba energie. Dále je možné velmi významně snížit spotřebu stroje výběrem vhodných nástrojů a úpravou řezných podmínek na optimální, tímto krokem se zvýší produktivita stroje, čímž se stroj stává efektivnějším. Bylo zjištěno, že snižování spotřeby energie hlavních a vedlejších pohonů stroje má zanedbatelný význam, což je způsobeno používáním motorů s vysokou účinností. Od 1. ledna 2015 mají výrobci povinnost dodávat do výrobních strojů s výkonem motorů od 7,5 do 375 kW, motory s účinností třídy IE3 nebo případně motory s měničem frekvence ve třídě účinnosti IE2. Z těchto legislativních závazků vyplývá, že snižování energie dosazováním motorů s vyšší účinností je neekonomické [23][25][26][21][19].



Obr. 13 Postup snižování spotřeby energie [19]

Například DMG MORI udává průměrné snížení spotřeby energie u nových strojů z řady Ecoline až o 30%. Firma Yamazaki Mazak corporation, dále jen MAZAK, vyrábí nové stroje se sníženou spotřebou elektrické energie až o 22% [23][20].

5 INTELIGENTNÍ TECHNOLOGIE

Inteligentní systémy kontroly stroje dnes využívá většina výrobců přesných obráběcích strojů. Každý výrobce ovšem tyto systémy prodává pod různým označením. Tyto systémy jsou nezbytné pro dosažení velké přesnosti obráběcích strojů a využití jejich maximálního výkonu. Také napomáhají obsluze strojů k optimalizování výrobních časů, zvyšují přesnost a produktivitu stroje. V neposlední řadě také zvyšují bezpečnost pracoviště [18][20].

5.1 AKTIVNÍ KONTROLA VIBRACÍ

Tato funkce se využívá ke kontrole vibrací stroje, toto je důležité především při velkých rychlostech vřetene. Pomocí této funkce lze dosáhnout lepšího povrchu obrobku, vyšších přesností a také delší životnosti obráběcího nástroje. Pomocí čidel se monitoruje chvění stroje a řídicí systém automaticky upravuje otáčky případně moment vřetene [18][20].



Obr. 14 Symboly aktivní kontroly vibrací [20][18]

5.2 INTELIGENTNÍ TEPLOTNÍ ŠTÍT

Tato funkce vyhodnocuje teplotu obráběcího stroje v důležitých místech, následně reguluje průtok chladicí kapaliny a odsávání ze stroje pro dosažení optimální teploty. Jestliže se přehřívá pouze jedna část stroje, řídicí systém zvýší průtok chladicí kapaliny pouze přehřátou částí. Pokud ještě není stroj zahřátý na pracovní teplotu, nebo je naopak přehřátý, dokáže tato funkce vypočítat teplotní dilatace stroje a následně upravit posuvy a otáčky vřetene tak aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího výrobku [20][12].



Obr. 15 Symboly inteligentního teplotního štítu [20][12]

5.3 INTELEKTUÁLNÍ BEZPEČNOSTNÍ ŠTÍT

Funkce pro vyšší bezpečnost obsluhy stroje při údržbě a výměně obrobků. Tato funkce je realizována pomocí koncových spínačů například na dveřích stroje, nebo světelných závor, které zastaví vřeteno popřípadě celý stroj, dojde-li k narušení nebezpečného prostoru stroje [20].



Obr. 16 Symbol inteligentního bezpečnostního štítu [20]

5.4 VERBÁLNÍ PORADCE

Tato funkce radí obsluhu stroje při nastavování stroje pro optimální využití jeho funkcí. Také varuje obsluhu při krizových situacích, což zvyšuje bezpečnost práce se strojem [20].



Obr. 17 Symbol verbálního poradce

5.5 INTELEKTUÁLNÍ VÝKON VŘETENA

Tato funkce monitoruje otáčky, vibrace a teplotu vřetena. Řídicí systém data vyhodnocuje a následně nastavuje otáčky tak aby došlo k co nejefektivnějšímu využití vřetena při přijatelné jakosti povrchu obrobku. Použitím této funkce se výrazně zvyšuje produktivita obráběcího stroje [20].



Obr. 18 Symbol inteligentního výkonu vřetena [20]

5.6 INTELIGENTNÍ PODPORA ÚDRŽBY

Univerzální rádce pro obsluhu při preventivní údržbě stroje. Tato funkce pomáhá redukovat náhlé výpadky stroje v důsledku špatné údržby, snižuje tak výrazně celkový čas a finanční náklady při neočekávaných opravách stroje [20].



Obr. 19 Symbol inteligentní podpory údržby [20]

5.7 INTELIGENTNÍ VYVAŽOVACÍ ANALYZÁTOR

Napomáhá vyvážit obrobek na stole, což je důležité pro minimalizování vibrací stroje. Obsluha vidí na operátorském panelu kam obrobek posunout, aby došlo k optimálnímu rozdělení váhy. Správné vyvážení obrobku má výrazný vliv na jakost povrchu, opotřebení nástroje a přesnost výrobku[20].



Obr. 20 Symbol inteligentního vyvažovacího analyzátoru [20]

5.8 INTELIGENTNÍ SYSTÉM PODAVAČE MATERIÁLU

Tento systém zabezpečuje, aby podavač materiálu vysunoval optimální kus materiálu, podavač tímto minimalizuje vysunutý materiál na nezbytné minimum při obrábění. Tato funkce také snižuje vibrace stroje. Při použití této funkce také dochází k úsporám materiálu a energie, které by byly vynaloženy na obrábění zbytečně větších kusů [20].



IBL

Obr. 21 Symbol inteligentního podavače materiálu[20]



5.9 ANTI KOLIZNÍ SYSTÉM

Tento systém slouží k zamezení kolizí v oblasti pracovního prostoru obráběcího stroje. Operační systém zná 3D model pracovního prostoru a souběžně s pracovním procesem vypočítává několik milisekund dopředu, jestli nedojde ke kolizi. Pokud systém vyhodnotí kolizní situaci, dokáže ji bezpečně zamezit, například zastavením vřetena. Tento systém chrání obráběcí stroj nebo i nástroj před poškozením. Tento systém využívá především firma Okuma [12].



Obr. 22 Symbol anti kolizního systému [18]

6 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH STROJŮ

V této kapitole jsou porovnány pětiosé frézovací stroje z různých hledisek. Stroje k porovnání byly vybírány k referenčnímu stroji MCU 700VT – 5X. Dalším parametrem pro výběr stroje byla výroba v odlišných zemích. Parametrem pro výběr strojů byl také průměr pracovního stolu okolo 800mm. Vybrané stroje jsou stroje multifunkční, pětiosá frézovací centra s kolébkou. U všech vybraných strojů je možné si zvolit z několika zakázkových provedení.

6.1 MCU 700VT-5X



Obr. 23 MCU 700VT-5X [4]

Multifunkční obráběcí frézovací centrum od firmy Kovosvit MAS, dále jen MAS, která sídlí ve Velkém Dvoře. Firma byla založena roku 1940. Tento stroj byl vybrán jako referenční pro výběr ostatních strojů k porovnání [22].

V dnešní době nabízí firma Kovosvit MAS tři série pětiosých obráběcích strojů, ve kterých je celkem 5 strojů. Z čehož jeden je multifunkční obráběcí stroj, MCU 700VT-5X[22].

Jako standardní příslušenství k tomuto stroji je dodáván pneumatický okruh značky Festo, dále hydraulický agregát, centrální mazání, automatické odsouvání střechy, chladicí agregát rozvaděče, chladicí agregát pro vnější chlazení nástrojů, dopravník třísek a dokumentace [4].

Jako zakázkové příslušenství je dodáváno: systém středového vysokotlakého chlazení nástrojů s pracovním tlakem 2MPa nebo 6 MPa, pásový filtr chladicí kapaliny, odsávací aerosolu Filtermist FX, 3D sonda obrobku, dálková diagnostika stroje, software pro online sledování vytížení strojů [4].

6.2 VARIAXIS i800



Obr. 24 VARIAXIS i800

Toto je multifunkční obráběcí frézovací centrum od firmy Yamazaki Mazak corporation. Firma byla založena roku 1919 v Nagoya v Japonsku. Tato firma patří k největším výrobcům a dodavatelům výrobních strojů na světě [20].

V dnešní době má firma v nabídce 7 sérií pětiosých obráběcích center, ve kterých je 52 strojů[20].

Jako zakázkové příslušenství jsou k tomuto stroji dodávány: automatické otevírání dveří, automatické vypínání stroje, automatické zapínání a zahřívání stroje, barevná signální světla, automatické měření délky nástroje, detekce kolize, olejový rozprašovací chladič, chladicí systém, vnitřní chlazení vřetene, filtr oleje. Tento stroj je také možné rozšířit o automatický výměník palet se dvěma paletami [24].

6.3 DMU 85 FD Mono Block



Obr. 25 DMU 85 FD Mono Block

Multifunkční obráběcí frézovací centrum od firmy DMG MORI. Tato firma vznikla v roce 2009 spojením strojírenských firem, dlouhodobě se zabývajících výrobou obráběcích strojů, GILDEMEISTER z Německa a MORISEIKI z Japonska.

V dnešní době nabízí firma DMG MORI univerzální pětiosé frézovací stroje v 9 typových řadách, celkem 39 strojů. Dále nabízí 5 řad těchto stejných univerzálních pětiosých frézovacích strojů celkem s 21 stroji, které jsou doplněny o výměník palet[23].

Tento stroj je možné rozšířit o automatický výměník palet s 8 paletami a nosností 150 kg. Palety se mění pomocí portálového jeřábu, který je součástí výměníku, výměna palety trvá méně než 40 s. Tímto způsobem se výrazně zvyšuje efektivita stroje. Jako zakázkové příslušenství je k tomuto stroji dodáváno: 3D sonda, laserový měřicí systém, barevná signální světla, filtr chladicí kapaliny, vnitřní chladicí agregát, dopravník třísek, vzduchový systém chlazení vřetene, pneumatický a hydraulický okruh [23].

6.4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY

Porovnání základních parametrů zvolených obráběcích strojů. Při porovnání výkonu vřeten je voleno vřeteno, které je standardně dodáváno ke stroji, u všech strojů je však možnost si zvolit z několika variant vřeten, dle potřeby zákazníka. Z Tab. 1 je zřejmé, že nevyšší pracovní rozsah má stroj DMU85FD mono Block s objemem pracovního prostoru $516,5 \text{ dm}^3$, má i nevyšší otáčky a to $18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Posuvovou rychlostí vyniká stroj MCU 700VT 5X. Stroj VARIAXIS i800 má nejkratší doby výměny nástrojů a nejkratší čas tiska-tříska, což má významný vliv na celkový čas obrábění.

Tab. 1 Základní parametry zvolených strojů

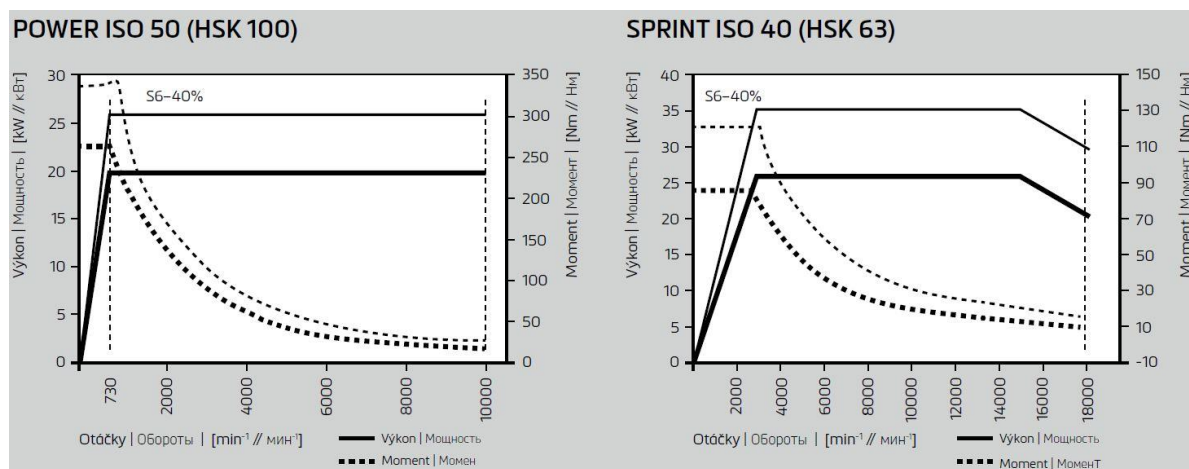
výrobce		MAS	MAZAK	DMG MORI
stroj		MCU 700VT 5X	VARIAXIS i-800	DMU85 FD mono Block
pracovní rozsah (x,y,z)	[mm]	700x820x550	730x850x560	935x850x650
průměr stolu	[mm]	800	800	800
rychloposuv	[m·min ⁻¹]	60	42	40
zrychlení	[m·s ⁻²]	6,5		6
otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	10000	10000	18000
výkon vřetena	[kW]	26	22	35
krouticí moment vřetena 40% ED	[Nm]	340	239	135
čas výměny nástroje	[s]	3	1,5	
čas tříska-tříska	[s]	7	4,5	5,9
rozměry VxŠxH	[mm]	4085 x 3460 x 3528	5364 x 2695 x 3515	3165 x 2975 x 4423
hmotnost stroje	[kg]	18000	19600	14000

6.5 NABÍZENÁ VŘETENA

Každý stroj je nabízen s několika základními typy vřeten, které si dle náročnosti aplikace volí sám zákazník. Většinou je jeden či dva typy vřeten dodáván jako standardní vybavení a zbylá vřetena jako zakázkové provedení [4][7][24].

6.5.1 VŘETENA PRO MCU 700VT 5X

MAS nabízí pro stroj MCU 700VT 5X 4 typy vřeten. Vřetena POWER a SPRINT jsou dodávána jako standardní, vřetena SPEED a RAPID jsou dodávána pouze na zakázku. Všechna vřetena mají integrovaný pohon bez vložené převodovky a hydraulickou brzdu[4].



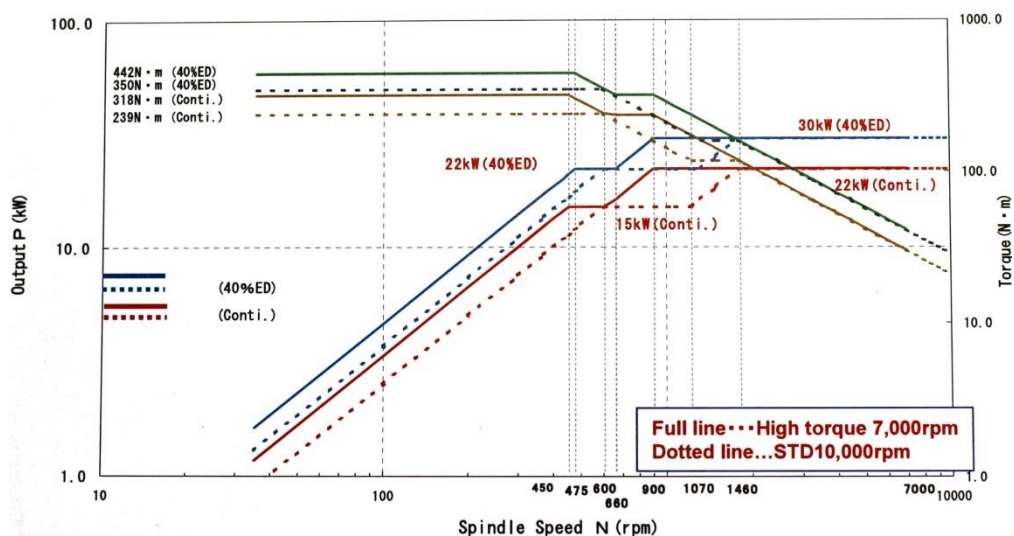
Obr. 26 výkonové a momentové charakteristiky pro vřetena POWER a SPRINT [4]

Tab. 2 Vřetena pro MCU 700VT 5X

Vřeteno - POWER		
Nástrojový držák	ISO 50	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	20 - 10000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	20 / 26
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	262 / 340
Vřeteno - MCU 700 SPRINT		
Nástrojový držák	HSK - A63	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	20 - 18000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	25 / 35
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	87 / 130
Vřeteno - MCU 700 SPEED (na zakázku)		
Nástrojový držák	HSK - A63, ISO 40	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	20 - 12000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	33 / 45
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	157 / 215
Vřeteno - MCU 700 RAPID (na zakázku)		
Nástrojový držák	HSK - A63	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	20 - 24000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	19 / 27
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	60 / 86

6.5.2 VŘETENA VARIAXIS i-800

Firma MAZAK nabízí ke stroji VARIAXIS i-800 tři typy vřeten, stroj je dodáván standardně s vřetenem STD, zbylá dvě vřetena, „Hight speed“, pro vysoké řezné rychlosti a



Obr. 27 Výkonové a momentové charakteristiky pro vřetena „Hight torque“ a STD[24]

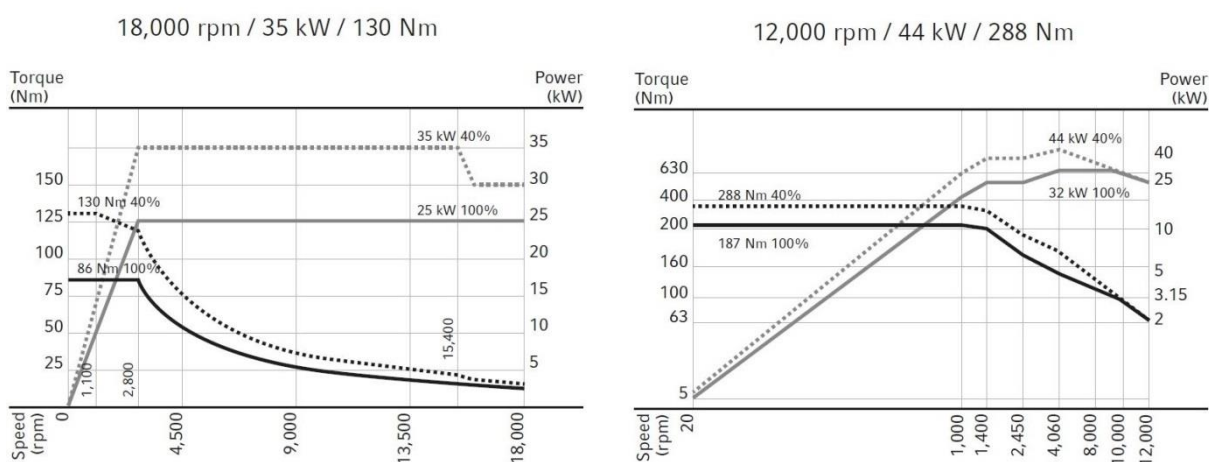
„Hight torque“, pro vysoký záběrový moment, jsou dodávána jako zakázkové provedení. Na obr. 26 jsou znázorněny průběhy momentu zelenou a hnědou barvou, průběhy výkonu modrou a zelenou, pro vřeteno STD platí tečkované průběhy, pro vřeteno „Hight speed“ plná čára. Všechna vřetena mají integrovaný pohon a hydraulické brzdy[24].

Tab. 3 Vřetena pro VARLAXIS i-800

Vřeteno - STD (standart)		
Nástrojový držák	MAS BT 50, CAT 50	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	10000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	30 / 22
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	350 / 239
Vřeteno – „Hight speed“		
Nástrojový držák	MAS BT 50, CAT 50	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	18000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	55 / 45
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	105
Vřeteno – „Hight torque“		
Nástrojový držák	MAS BT 50, CAT 50	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	7000
Výkon motoru vřetena (S1/S6 - 40%)	[kW]	30 / 22
Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 - 40%)	[Nm]	442 / 318

6.5.3 VŘETENA DMU 85 FD MONO BLOCK

Firma DMG MORI nabízí pro stroj DMU 85 FD Mono Block nejméně zakázkových vřeten, pouze dvě. Vřeteno 1 je dodáváno jako standardní. Vřetena se liší výkonem a krouticím momentem. Obě vřetena mají přímý pohon a hydraulické brzdy.



Obr. 28 Výkonové a momentové charakteristiky pro vřeteno 1 a 2 [7]

Tab. 4 Vřetena pro DMU 85 FD Mono Blok

Vřeteno - 1 (standart)		
Nástrojový držák	HSK-A63	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	18000
Výkon motoru vřetena (40% ED)	[kW]	35
Jmenovitý krouticí moment (40% ED)	[Nm]	130
Vřeteno - 2		
Nástrojový držák	HSK-A100	
max. otáčky vřetena	[ot·min ⁻¹]	12000
Výkon motoru vřetena (40% ED)	[kW]	44
Jmenovitý krouticí moment (40% ED)	[Nm]	288

6.6 ZÁSOBNÍKY NÁSTROJŮ

I v této oblasti je velká variabilita provedení, zásobníky nástrojů výrazně zkracují výrobní časy, obzvláště v případech, kdy se obrábí tvarově složité obrobky. Čím více je potřeba nástrojů pro obrobení součásti, tím důležitější úlohu zásobník nástrojů hraje. Každá firma nabízí několik typů zásobníků, které jsou variabilní i mezi jinými stroji dané firmy. Na obrázku obr. 26 je znázorněna výměna nástroje a umístění řetězového zásobníku na stroji.



Obr. 29 Vlevo výměník nástrojů, vpravo řetězový zásobník nástrojů [7]

Tab. 5 Zásobníky nástrojů

firma	standard	volitelná velikost
MAS	24/48	32/64
DMG MORI	30	60, 90, 120, 180
MAZAK	30	40, 80, 120

Jak je patrné z tabulky 5, základní zásobník nástrojů je výrazně menší než volitelné možnosti, největší výběr zásobníků nabízí firma DMG MORI.

6.7 ŘÍDICÍ SYSTÉMY

Systémy vybraných strojů komunikují na rozhraní profibus I/F nebo ethernet - IP. Všechny vybrané stroje mají možnost dálkového ovládání a dálkové diagnostiky. Dálková diagnostika je analýza stroje za pomoci jeho vlastních diagnostických funkcí, servisní technik může vidět na dálku obrazovku CNC stroje a pomocí chatu komunikuje s operátorem stroje. Tato aplikace zkracuje dobu odstávky stroje, následný servisní zásah je přesně zaměřen.

U stroje MCU 700VT si zákazník může zvolit ze dvou řídicích systémů, Sinumeric 840D nebo Heidenhain iTNC640, panely řídicích systémů jsou znázorněny na obr. 30. VARIAXIS i800 využívá systém MAZATROL MATRIX II který vyvíjí přímo firma MAZAK. Řídicí panel je znázorněn na obr. 28 [4][24].



Obr. 30 Vlevo řídicí panel Heidenhain iTNC640, vpravo řídicí panel Sinumeric 840D[23]

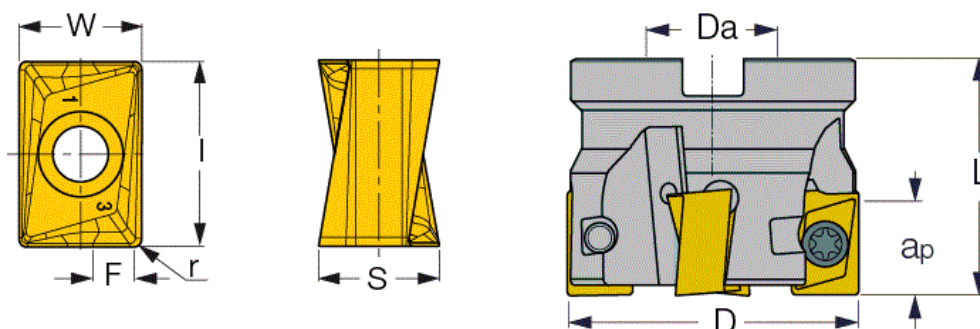
DMU 85 FD Mono Block je dodáván s programem CELOS, tento program slouží k interaktivnímu zobrazení obráběcího procesu, prohlížení výkresové dokumentace či modelu. Každý operátor má vlastní identifikační čip, kterým se přihlásí do systému, dle pravomocí jsou mu zpřístupněny příslušné aplikace. Řídicí panel s programem Celos je znázorněn vlevo na obr. 29. Program CELOS je platformou řídicího systému Sinumeric nebo Haidenhain. Firma DMG MORI nabízí zakázkové provedení s řídicími systémy, Heidenhain TNC640 a Sinumeric 840Ds. DMG MORI nabízí 23 strojů s programem CELOS[10].



Obr. 31 Vlevo řídicí panel Celos, vpravo řídicí panel Mazatrol Matrix II [20][23]

7 VÝPOČET KROUTICÍHO MOMENTU VŘETENE

Zde je uveden výpočet návrhu pohonu vřetene, výpočet momentu vřetene, výchozí operace je čelní frézování, výpočet je pro hrubovací operaci. Pro výpočet volím materiál S 235 JRG 1, je to běžná konstrukční neušlechtilá ocel obvyklé jakosti, vhodná zejména ke svařování. Dále volím nástroj, hrubovací čelní 90° frézu H490 F90AX D080-7-27-17 z katalogu Iscar se sedmi destičkami H490 ANKX 170612PNTR s podvlakem TiAlN. Řeznou rychlost jsem zvolil z doporučené řezné rychlosti, $V_c = 180 \text{ m min}^{-1}$, posuv na zub $f_z = 0,2 \text{ mm zub}^{-1}$ a maximální hloubku záběru $a_p = 7 \text{ mm}$ [2].



Obr. 32 Vlevo břitové destičky, vpravo fréza [2]

Tab. 6 Zvolené a doporučené parametry

Zvolené a doporučené parametry	
Doporučená řezná rychlost	$V_c = 160 - 190 \text{ m min}^{-1}$
Posuv na zub	$f_z = 0,1 - 0,3 \text{ mm zub}^{-1}$
Úhel řezné hrany	$\kappa = 90^\circ$
Faktor tloušťky třísky	$mc = 22$
Specifické řezné síly pro třísku o průřezu 1 mm^2	$K_{c1} = 1500 \text{ N mm}^{-2}$
Průměr nástroje	$D = 80 \text{ mm}$
Počet zubů	$Z = 7$
Šířka řezu	$b = 60 \text{ mm}$
Délka řezu	$L_w = 300 \text{ mm}$
Maximální hloubka záběru	$a_p = 16,3 \text{ mm}$

Výpočet otáček vřetene:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{180 \cdot 1000}{\pi \cdot 80} = 716,2 \text{ min}^{-1} \quad (7.1)$$

Posuv vřetene:

$$V_f = Z \cdot n \cdot f_z = 7 \cdot 716,2 \cdot 0,2 = 1002,7 \text{ mm min}^{-1} \quad (7.2)$$



Posuv na otáčku:

$$f_n = f_z \cdot Z = 0,2 \cdot 7 = 1,4 \text{ mm ot}^{-1} \quad (7.3)$$

Odebraný materiál:

$$Q = \frac{a_p \cdot b \cdot V_f}{1000} = \frac{7 \cdot 80 \cdot 1002,7}{1000} = 561,5 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \quad (7.4)$$

Čas obrábění:

$$Th = \frac{Lw}{V_f} = \frac{300}{1002,7} = 0,3 \text{ min}^{-1} \quad (7.5)$$

Specifická řezná síla:

$$K_c = K_{c1} \cdot h_m^{-mc} = 1500 \cdot 0,1^{-0,22} = 2489,4 \text{ N mm}^{-2} \quad (7.6)$$

Průměrná tloušťka třísky při bočních úběrech:

$$hm = \frac{\sin(\kappa) \cdot 180 \cdot b \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arcsin(\frac{b}{D})} = \frac{\sin(90^\circ) \cdot 180 \cdot 60 \cdot 0,2}{\pi \cdot 80 \cdot \arcsin(\frac{80}{80})} = 0,1 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Potřebný výkon vřetena:

$$P = \frac{a_p \cdot b \cdot V_f \cdot K_c}{6 \cdot 10^7 \cdot \eta_c} = \frac{7 \cdot 60 \cdot 1002,7 \cdot 2489,4}{6 \cdot 10^7 \cdot 0,96} = 18,2 \text{ kW} \quad (7.8)$$

Řezná síla:

$$F_c = f_z \cdot K_c \cdot a_p = 0,2 \cdot 2489,4 \cdot 7 = 3485,2 \text{ N} \quad (7.9)$$

Krouticí moment motoru:

$$M_k = F_c \cdot \frac{D}{2 \cdot 1000 \cdot \eta_c} = 3485,2 \cdot \frac{80}{2 \cdot 1000 \cdot 0,96} = 145,2 \text{ Nm} \quad (7.10)$$

Naddimenzování motoru o 20 %:

$$M_c = 1,2 \cdot M_k = 1,2 \cdot 145,2 = 174,2 \text{ Nm} \quad (7.11)$$

Účinnost vřetene:

$$\eta_c = \eta_L^i = 0,99^4 = 0,96 \quad (7.12)$$

Největší ztráty na vřetenu pocházejí z jeho uložení, účinnost vřetene lze vypočítat z účinností ložisek vřetena a to tak že se jednotlivé účinnosti ložisek vynásobí. Účinnost jednoho kuličkového ložiska je $\eta_L = 0,99$ [6].



ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá moderními pětiosými frézovacími stroji, technologiemi, komponentami a moderními materiály, které se aktuálně při konstrukci využívají.

První kapitola jsou popsány základní komponenty pětiosých obráběcích strojů a principy jejich funkce s důrazem na aktuálnost. Ve druhé kapitole je nastíněn výpočet tuhosti stroje se znázorněnými metodami výpočtů a měření. Třetí kapitola se zabývá výpočtem rozběhu vřetene na jmenovité otáčky pro vřeteno POWER stroje MCU 700VT 5X ovšem bez znalosti momentů setrvačnosti tohoto vřetene, moment setrvačnosti by se dal zjistit například pomocí modelu v programu Inventor. Další kapitola popisuje energetickou náročnost dnešních strojů a trend snižování spotřeby energie podepřený legislativními kroky z evropské unie. V páté kapitole jsou shrnuty poznatky o inteligentních technologiích, které využívají moderní pětiosé frézovací stroje, tyto technologie zvyšují produktivitu práce, zlepšují rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu obrobku, také zvyšují bezpečnost stroje a v neposlední řadě chrání samotný stroj před kolizemi a poškozením.

V šesté kapitole jsou zvoleny a porovnány stroje MCU 700VT 5X od výrobce MAS z české produkce, VARIAXIS i800 od výrobce MAZAK z Japonska a stroj DMU 85 FD Mono Block od výrobce DMG MORI z Německa a Japonska. Stroje byly vybrány k referenčnímu stroji MCU 700VT 5X. Dalším kritériem pro výběr bylo, aby byl stroj univerzální s kinematikou stůl stůl kolíbkou.

Nejvíce volitelných komponent má stroj DMU 85 FD Mono Block. Vřetena od jednotlivých výrobců jsou si parametry podobná, každý se snaží pokrýt maximální rozsah využití. Dále jsou v této kapitole porovnány zásobníky nástrojů a řídicí systémy, přičemž nejvíce možností nabízí firma DMG MORI. Firma MAZAK využívá svůj vlastní řídicí systém, DMG MORI a MAS instalují do těchto strojů řízení značek Haidenhain a Sinumeric.

Největším problémem při porovnávání strojů byly nekonzistentní informace od výrobců, například firma MAZAK veřejně neuvádí parametry svých strojů. Dalším problémem byly anglické názvy různých prvků strojů, které si výrobci sami pojmenovali, mnohdy se jedná o stejný prvek na jiném stroji avšak s jiným názvem. Výraznou roli při srovnávání strojů hraje cena, kterou žádný výrobce přímo neuvádí, je proto nemožné zvážit který stroj je z ekonomického hlediska nejlepší.

V poslední kapitole je naznačen výpočet krouticího momentu vřetene pro hrubovací operaci, který se provádí při návrhu vřetene pro zvolené podmínky obrábění.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Metody frézování: Kinematika strojů. *Frezovani-5os* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <<http://www.frezovani-5os.cz/metody-frezovani/kinematika-stroju/>>
- [2] ISCAR . *Eatalog* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <<https://http://www.iscar.com/Ecatalog/>>
- [3] BAJZA, S. Konstrukce naklápěcího stolu pro pětiosé frézování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
- [4] KOVOSVIT MAS: *Multifunkční pětiosá obráběcí centra* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <<http://www.kovosvit.cz/upload/products/pdf/mcu-700vt-5x-1421741738.pdf>>
- [5] SSRZR: *Učebnice* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <<http://sstzr.cz/download/cat1/ucebnicecnc.pdf>>
- [6] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [7] DMG MORI: *DMU/DMC monoBLOCK series* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <<http://cz.dmgmori.com/blob/123448/1d412fb6cdcb4ad4167eca1d50a199c9/pm0uk15-dmu-dmc-monoblock-series-pdf-data.pdf>>
- [8] ETEL S.A.: *What is a torque motor – principle*[online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <<http://www.etel.ch/torque-motors/principle/>>
- [9] RENISHAW: *Magnetic linear encoders and magnetic ring encoders*[online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <http://www.renishaw.com/en/magnetic-linear-encoders-and-magnetic-ring-encoders--9802>>
- [10] DMG MORI: *New Operating System CELOS World Premiere at EMO Hannover 2013*[online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <http://www.dmgmoriseiki.co.jp/en/news/pdf/20130918_celos_e.pdf>
- [11] SLÁMA, J. Konstrukční návrh otočného stolu TDV 25. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 125 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
- [12] OKUMA: *Intelligent technology. Thermo friendly concept* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <<http://www.okuma.eu/intelligent-technology/thermo-friendly-concept/>>
- [13] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů* [online]. 1. Plzeň, 2012 [cit. 2015-05-28]. ISBN 978-80-261-0126-0. Dostupné z: <https://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf>
- [14] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Výrobní stroje obráběcí* [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 145 s. [cit. 2015-05-28]. ISBN 978-80-248-2941-8.



- [15] DMG MORI: Journal. *DMU FD 5-axis milling/turning* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <http://www.dmgmori.com/webspecial/journal_2014_2/en-US/wp-dmu-fd.htm>
- [16] CMI: *screw thread mechanics* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/textbooks_dvd_only/DAN/threads/mechanics/mechanics.html>
- [17] REM-TECHNIC: *Pohon sozubeným hřebenem* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <<http://www.rem-technik.cz/pohyb-pohony-prevody/pohon-s-ozubenym-hrebenem/ztrs-ph-a-pohon-s-ozubenym-hrebenem-319.html>>
- [18] OKUMA: Intelligent technology. *Machining navi* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <<http://www.okuma.eu/intelligent-technology/machining-navi/>>
- [19] Ekodesign – cesta k efektivní výrobě a technologiím. *MM Průmyslové spektrum*. **2014**(1): 2. ISSN 1212-2572.
- [20] YAMAZAKI MAZAK CORPORATION. *MAZAK* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <<https://www.mazakeu.com/>>
- [21] Konstruování obráběcích strojů s ohledem na úsporu energie. *MM Průmyslové spektrum*. **2014**(1): 2. ISSN 1212-2572.
- [22] Kovosvit MAS [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <<http://http://www.kovosvit.cz/cz/>>
- [23] DMG Mori [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <<https://http://http://cz.dmgmori.com/>>
- [24] YAMAZAKI MAZAC CORPORATION. *Sales Manual: VARIAXIS i800* [online]. 2012, 19 s. [cit. 2015-05-28].
- [25] *Zkušenosti s problematikou ekodesignu při konstrukci* [online]. **2013**(11): 3 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zkusenosti-s-problematikou-ekodesignu-pri-konstrukci.html>>
- [26] *Obrábět stejně za méně – energetická efektivita obráběcích strojů* [online]. **2013**(11): 1 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabet-stejne-za-mene-energeticka-efektivita-obrabecich-stroju.html>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

φ	[rad]	úhel natočení
κ	[$^{\circ}$]	úhel řezné hrany
δ	[μm^{-1}]	deformace stroje
n	[min^{-1}]	otáčky vřetene
b	[mm]	šířka řezu
Z	[–]	počet zubů
Th	[min^{-1}]	čas obrábění
Q	[$cm^3 min^{-1}$]	odebraný materiál
P	[kW]	potřebný výkon vřetena
Lw	[mm]	délka řezu
D	[mm]	průměr nástroje
n	[min^{-1}]	otáčky vřetene
mc	[–]	faktor tloušťky třísky
k	[$N\mu m^{-1}$]	tuhost v posunutí
F	[N]	zvolené zatížení
η_c	[–]	celková účinnost
η_L	[–]	účinnost ložiska
ε_v	[$rad s^{-2}$]	úhlové zrychlení vřetena
ε_m	[$rad s^{-2}$]	úhlové zrychlení motoru
t_r	[s]	doba rozběhu
n_v	[s^{-2}]	otáčky vřetena
k_o	[$N\mu m^{-1}$]	tuhost v ohybu
k_k	[$Nm rad^{-1}$]	tuhost v krutu
i_p	[–]	převodový poměr převodovky
i_1	[–]	převodový poměr vloženého převodu
f_n	[$mmot^{-1}$]	posuv vřetene
a_p	[mm]	maximální hloubka záběru
V_f	[$mmmin^{-1}$]	posuv vřetene
M_m	[Nm]	Moment servopohonu
M_k	[Nm]	zvolený krouticí moment
M_k	[Nm]	krouticí moment motoru
M_c	[Nm]	naddimenzovaný krouticí moment motoru



K_{c1}	$[Nmm^{-2}]$	specifické řezné síly pro třísku o průřezu $1mm^2$
K_c	$[Nmm^{-2}]$	specifická řezná síla
J_v	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti vřetena
J_{red}	$[kgm^2]$	redukovaný moment setrvačnosti
J_p	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti vložené převodovky
J_m	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti kotvy rotoru
J_{br}	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti brzdy
J_N	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti nástroje
J_2	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti hnané řemenice
J_1	$[kgm^2]$	moment setrvačnosti řemenice (pastorku)
F_c	$[N]$	řezná síla
V_c	$[m\ min^{-1}]$	doporučená řezná rychlost
h_m	$[mm]$	průměrná tloušťka třísky při bočních úběrech
f_z	$[mm\ zub^{-1}]$	posuv na zub



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vlevo hlava stůl, vpravo hlava hlava[1].....	12
Obr. 2 Vlevo stůl stůl, vpravo stůl stůl kolíbka[1]	12
Obr. 3 MCU 700VT-5X [4].....	13
Obr. 4 Otočný naklápěcí stůl Ultrasonic 65 mono BLOCK [7]	14
Obr. 5 Torzní motor [8].....	14
Obr. 6 Magnetické odměřování kruhové a lineární [9]	15
Obr. 7 Elektrovřeteno powerMASTER m1000 DMG MORI [15]	16
Obr. 8 Kuličkový šroub [16].....	17
Obr. 9 Pohon s hřebeny ZTRS-PH(A) se šikmým ozubením od STÖBER [17].....	17
Obr. 10 Lineární motor [8]	18
Obr. 11 Vlevo výpočtový model pomocí MKP, vpravo schéma měření deformace v ose z [4]	19
Obr. 12 Schéma přenosu krouticího momentu	20
Obr. 13 Postup snižování spotřeby energie [19].....	21
Obr. 14 Symboly aktivní kontroly vibrací [20][18]	22
Obr. 15 Symboly inteligentního teplotního štítu [20][12]	22
Obr. 16 Symbol inteligentního bezpečnostního štítu [20]	23
Obr. 17 Symbol verbálního poradce.....	23
Obr. 18 Symbol inteligentního výkonu vřetena [20]	23
Obr. 19 Symbol inteligentní podpory údržby [20]	24
Obr. 20 Symbol inteligentního vyvažovacího analyzátoru [20].....	24
Obr. 21 Symbol inteligentního podavače materiálu[20]	24
Obr. 22 Symbol anti kolizního systému [18].....	25
Obr. 23 MCU 700VT-5X [4].....	26
Obr. 24 VARIAXIS i800.....	27
Obr. 25 DMU 85 FD Mono Block	28
Obr. 26 výkonové a momentové charakteristiky pro vřetena POWER a SPRINT [4]	29
Obr. 27 Výkonové a momentové charakteristiky pro vřetena „Hight torque“ a STD[24].....	30
Obr. 28 Výkonové a momentové charakteristiky pro vřeteno 1 a 2 [7]	31
Obr. 29 Vlevo výměník nástrojů, vpravo řetězový zásobník nástrojů [7].....	32
Obr. 30 Vlevo řídicí panel Heidenhain iTNC640, vpravo řídicí panel Sinumeric 840D[23] ..	33
Obr. 31 Vlevo řídicí panel Celos, vpravo řídicí panel Mazatrol Matrix II [20][23]	33
Obr. 32 Vlevo břitové destičky, vpravo fréza [2].....	34



SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní parametry zvolených strojů	29
Tab. 2 Vřetena pro MCU 700VT 5X.....	30
Tab. 3 Vřetena pro VARIAXIS i-800	31
Tab. 4 Vřetena pro DMU 85 FD Mono Blok	32
Tab. 5 Zásobníky nástrojů	32
Tab. 6 Zvolené a doporučené parametry	34